

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

ПИСКУН
Геннадий Адамович

**МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2013

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Алексеев Виктор Федорович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Абрамов Игорь Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ефименко Сергей Афанасьевич, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация **Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»**

Защита диссертации состоится «24» октября 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развиваются новые направления в микро- и наноэлектронике связанные с созданием, исследованием и применением электронных схем с топологическими размерами компонентов менее микрометра. Одними из наиболее распространенных и современных изделий микроэлектроники являются микроконтроллеры. Их обширная номенклатура, обусловленная разнообразными функциональными возможностями, создает разработчикам изделий достаточно хорошие условия для проектирования сложной конкурентоспособной аппаратуры различного назначения. Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту микроконтроллеров от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного влияния, как электростатический разряд. Стоит отметить, что от 8 до 33 % всех повреждений электронных средств и их компонентов обусловлено действием статического электричества, что эквивалентно суммарному ежегодному ущербу в миллиарды долларов.

На сегодняшний день существует достаточно большое число работ в области определения влияния разрядов статического электричества на функционально сложные изделия твердотельной электроники. Наиболее значимые результаты были получены российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования в таких областях, как воздействие импульсных электромагнитных помех на электронные средства (С.Ф. Чермошнецев, З.М. Гизатуллин); влияние разрядов статического электричества на полупроводниковые изделия (М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Л.П. Ануфриев); методы защиты устройств от электромагнитных помех (Л.Н. Кечиев); средства защиты интегральных схем от воздействия деструктивных импульсов (В.А. Каверзнев, Г.Д. Грошева). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы Ч. Джоввета, Э. Хабигера и А. Шваба, в которых представлено описание некоторых механизмов влияния и упрощенные аналитические подходы для решения задач, связанных с воздействием разрядов статического электричества на приборы.

Производителями изделий электронной техники уделяется значительное внимание оптимизации методов и средств защиты, а также алгоритмам технической диагностики выпускаемых изделий после воздействия электростатических разрядов, которые в своем большинстве не могут быть распространены на микроконтроллеры. Это обусловлено спецификой формирования архитектуры полупроводникового кристалла и наличием такого функционального блока, как флеш-память. Данная особенность значительно усложняет проведение испытаний на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества, поскольку отказы могут происходить не только вследствие повреждения элементов кристалла, но и из-за изменения инсталлированного массива данных, анализ повреждения которого в настоящих алгоритмах отсутствует.

Таким образом, рассматриваемые в диссертации вопросы по контролю функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память программным обеспечением после воздействия электростатических разрядов представляют собой актуальную проблему. Особое внимание уделено алгоритмам технической диагностики с проверкой целостности записанного массива данных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы утверждена на заседании Совета учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 9 от 14 декабря 2009 г.) и соответствует подразделу 12.1 «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР и соответствует научному направлению университета «Сертификация, диагностика и испытания элементов, устройств и систем», утвержденному приказами ректора университета от 26.01.2011 № 52-н и от 01.11.2011 № 876-н.

Часть результатов диссертации получена в рамках проведения научных исследований по ГБ № 12-2021 «Разработка феноменологических моделей и научно-методических основ компьютерного проектирования радиоэлектронных средств, технического обеспечения безопасности и создания электронных систем безопасности» (2012–2016, № ГР 20123088) и в соответствии с грантом Министерства образования Республики Беларусь на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами, студентами по теме «Моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковые приборы радиоэлектронных средств» (2011–2012, № ГР 20121726).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в исследовании воздействия разрядов статического электричества на интегральные схемы (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) и разработке методик выявления повреждений записанного во встроенную флеш-память кода после воздействия электростатических разрядов.

Поставленная цель диссертационной работы определяет следующие основные задачи:

1. Анализ текущего состояния проблемы и возможность разработки новых алгоритмов технической диагностики микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память программным обеспечением.

2. Постановка, формализация и решение задач по расчету распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллеров в результате воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод, которые обеспечивают визуализацию тепловых полей в токопроводящих элементах микроконтроллера при воздействии разряда с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics.

3. Проведение экспериментов по разработанной методике определения области неустойчивого функционирования кода, установленного во встроенную флеш-память микроконтроллеров, в условиях воздействия статического электричества на наружный вывод по методу контактного разряда.

4. Разработка методики анализа целостности установленного во встроенную флеш-память микроконтроллера программного обеспечения после воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод.

Объектом исследования в диссертации являются микроконтроллеры с установленным во встроенную электрически перепрограммируемую флеш-память программным обеспечением. В качестве *предмета исследования* рассматриваются математические и компьютерные модели распространения электростатического разряда в изделиях твердотельной электроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета распределения температуры в токопроводящих элементах интегральных схем (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) в результате воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод, основанная на системе уравнений теплопроводности и электропроводности, позволяющая производить прогнозирование отказа интегральных схем при напряжении воздействующего контактного разряда от 2 до 25 кВ.

2. Методика экспериментального определения области неустойчивого функционирования интегральных схем (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) в условиях воздействия статического электричества, позволяющая установить начальное значение напряжения, при котором происходит изменение в установленном программном коде, основанная на статистическом анализе целостности обрабатываемого массива данных, что позволяет расширить возможности диагности-

рования микроконтроллеров и электронных систем на их базе до наступления неработоспособного состояния.

3. Методика анализа целостности инсталлированного во встроенную флеш-память микроконтроллера программного обеспечения после воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод, основанная на сверке претерпевшего изменения массива данных с эталонным, позволяющая определить степень повреждения кода и оценить влияние данных изменений на функциональные и эксплуатационные характеристики микроконтроллеров.

Личный вклад соискателя

В диссертационной работе представлены материалы исследований, которые являются результатом самостоятельной работы автора. Соискателем выполнены исследования по определению влияния электростатических разрядов на микроконтроллеры, обобщены сведения по значениям напряжения разряда, при котором происходят изменения в инсталлированном программном коде, а также проведен анализ полученных результатов.

Планирование работ, определение структуры, целей и задач исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом В.Ф. Алексеевым.

В совместных работах с соавторами соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах проведения исследований по разработке методики расчета распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллеров, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке материалов к опубликованию.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих республиканских и международных конференциях и семинарах: 14-й, 15-й Международные молодежные форумы «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, Украина, 2010–2011 гг.; 7, 8 и 9-я Международные молодежные научно-технические конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», Севастополь, Украина, 2011–2013 гг.; 3, 4 и 5-я Международные студенческие научно-технические конференции «Новые направления развития приборостроения», Минск, Беларусь, 2010–2012 гг.; Международный форум студенческой и учащейся молодежи «Первый шаг в науку – 2010», Минск, Беларусь, 2010 г.; XIII Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследова-

дованиях», Гомель, Беларусь, 2010 г.; I Республиканская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Научные стремления – 2010», Минск, Беларусь, 2010 г.; 47,48 и 49-я научно-технические конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 2011–2013 гг.

Опубликованность результатов диссертации

Изложенные в диссертационной работе основные положения и выводы опубликованы в 12 печатных работах. В их числе 6 статей в рецензируемых научных журналах, 3 статьи в сборниках материалов научных конференций, 2 тезисов докладов на научных конференциях и 1 патент Республики Беларусь.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республики Беларусь, составляет 2,7 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и четырнадцати приложений.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана ее научная и практическая значимость. В **первой главе** рассматриваются особенности структуры и архитектуры современных микроконтроллеров, принципы формирования в них данных, виды доступа к данным и принцип работы флеш-памяти. Во **второй главе** рассматриваются методики технической диагностики и средства испытаний микроконтроллеров на устойчивость к электростатическим разрядам, анализируются типовые механизмы возникновения повреждений микроконтроллеров, вызванные воздействием электростатических разрядов. В **третьей главе** представлена методика расчета распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллеров вследствие воздействия статического электричества по методу контактного разряда, основанная на системе уравнений теплопроводности и электропроводности. В **четвертой главе** разработана методика определения области неустойчивого функционирования микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью после воздействия статического электричества по методу контактного разряда с необходимостью сверки инсталлированного массива данных до и после действия импульса, а также представлена методика анализа целостности записанного во встроенную флеш-память микроконтроллера программного обеспечения после воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод. В **пятой главе** приведены результаты экспериментов по разработанным методикам контроля функционирования, подтверждающие их адекватность и достоверность при осуществле-

нии технической диагностики функционально сложных устройств. В приложениях приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс и производство.

Общий объем диссертационной работы составляет 129 страниц. Из них 67 страниц основного текста, 55 иллюстраций на 26 страницах, 21 таблица на 10 страницах, библиографический список из 124 наименований на 9 страницах, список собственных публикаций соискателя из 12 наименований на 2 страницах и 14 приложений на 15 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние проблемы технической диагностики микроконтроллеров, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также ее структура и объем.

В первой главе рассматриваются особенности внутренней структуры и варианты архитектуры современных широко используемых семейств микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью, приводятся принципы реализации памяти и организация выборки команд данных.

В результате проведенного анализа особенностей построения флеш-памяти микрокомпонентов были выделены две основные структуры: память на основе ячеек «НЕ-ИЛИ» (англ. «Not OR») и «НЕ-И» (англ. «Not AND»). Главным отличием данных ячеек является объем записываемого программного обеспечения. Отмечено, что процессы записи/стирания кода в памяти «НЕ-И» выполняются значительно быстрее, чем в памяти «НЕ-ИЛИ». Последовательная структура организации ячеек позволяет получить высокую степень масштабируемости полупроводниковых кристаллов, что делает структуру «НЕ-И» наиболее значимой при наращивании объемов памяти. Поскольку туннелирование электронов осуществляется через всю площадь канала ячейки памяти, интенсивность захвата заряда на единицу площади в «НЕ-И» ниже, чем в «НЕ-ИЛИ», в результате чего данная память имеет более высокое количество циклов записи/стирания.

Особенность построения флеш-памяти можно характеризовать по методу доступа к ее ячейкам. В основном выделяют три метода доступа к флеш-памяти: обычный (происходит асинхронное чтение определенных ячеек), пакет-

ный (данные читаются по блокам) и страничный (напоминает пакетный метод, но данные принимаются асинхронно).

Процесс чтения, стирания и записи информации, инсталлированной во встроенную флеш-память микроконтроллера, базируется на туннелировании электронов.

При извлечении данных из памяти заряд на «плавающем» затворе отсутствует, а на управляющий затвор подается заряд положительного направления. Под его воздействием между стоком и истоком создается свободная зона, что позволяет данным памяти считываться с истока.

Высокое положительное напряжение на истоке приводит к стиранию информации из флеш-памяти.

Запись массива данных во флеш-память микроконтроллеров осуществляется за счет переноса заряда в область «плавающего» затвора через слой диэлектрика.

Несоответствие подаваемых напряжений на области истока и затвора (стирание кода) и на области затвора и стока (запись кода) вследствие внешнего воздействия разрядов статического электричества может привести к некорректному срабатыванию вышеуказанных областей.

Во второй главе приведены методики технической диагностики микроконтроллеров с инсталлированным во встроенную электрически перепрограммируемую флеш-память программным обеспечением после воздействия электростатических разрядов.

Испытания микроконтроллеров на воздействие разрядов статического электричества проводятся преимущественно по трем основополагающим моделям: модель тела человека, машинная модель и модель заряженного прибора. Основным отличием данных моделей является то, что параметры разряда варьируются по длительности и форме импульса, однако закономерности их развития практически идентичны. Для оценки действия электростатического разряда наиболее важен учет напряжения и длительность импульса, которые обладают наибольшим вкладом в возникновение неисправностей.

При проведении анализа механизмов повреждений после воздействия разрядов статического электричества, свойственных для микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью выявлено, что в большинстве случаев они могут быть обусловлены не только физико-химическими изменениями в полупроводниковом кристалле. Это характерно также и для таких компонентов, как наружный вывод, внутренний вывод, контактная площадка, область металлизации и полупроводниковый кристалл.

В третьей главе разработана методика расчета распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллера после воздействия статического электричества по методу контактного разряда.

Автором в программном пакете Comsol Multiphysics была разработана имитационная модель микроконтроллера, состоящая из областей в каждой из которых решались уравнения электропроводности и теплопроводности с учетом граничных условий. В данной модели были использованы следующие обозначения:

1. «Наружный вывод», на который осуществляется воздействие статического электричества по методу контактного разряда, представлен участком из материала «Медь». Он соединен с внутренним выводом.

2. «Внутренний вывод», соединяющий контактный вывод микроконтроллера с контактной площадкой, представлен участком «Золото».

3. «Контактная площадка», сформированная на кристалле и соединяющая внутренний вывод с областью металлизации, задана следующими параметрами:

– для 1-го типа участок представлен материалом «Золото» (было принято во внимание то, что при соединении золотой проволоки с алюминиевой контактной площадкой термокомпрессией в месте контакта могут образоваться хрупкие интерметаллические соединения, что значительно ухудшает качество микроконтроллеров данного типа);

– для 2-го типа участок представлен материалом «Алюминий» (в данном случае при взаимодействии материалов внутреннего вывода и контактной площадки микроконтроллера образуется надежное однокомпонентное микросварное соединение).

4. «Металлизация» на полупроводниковом кристалле микроконтроллера представлена участком «Алюминий».

5. «Полупроводниковый кристалл» представлен участком «Кремний».

Осуществление расчетов построенной модели распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллера в программном комплексе COMSOL Multiphysics было основано на решении уравнений тепло- и электропроводности.

В четвертой главе представлены основные требования к средствам и порядку проведения испытаний микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью на устойчивость к воздействию электростатических разрядов, разработаны алгоритмы диагностирования, а также впервые приведены методики контроля функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров с инсталлированным во встроенную флеш-память программным обеспечением после воздействия статического электричества по методу контактного разряда.

При разработке алгоритмов поиска дефектов было установлено, что предельное значение воздействующего электростатического разряда не является существенным показателем для микроконтроллеров по сравнению со значением напряжения импульса, при котором происходит нарушение выполнения запрограммированных функций (рисунок 1).

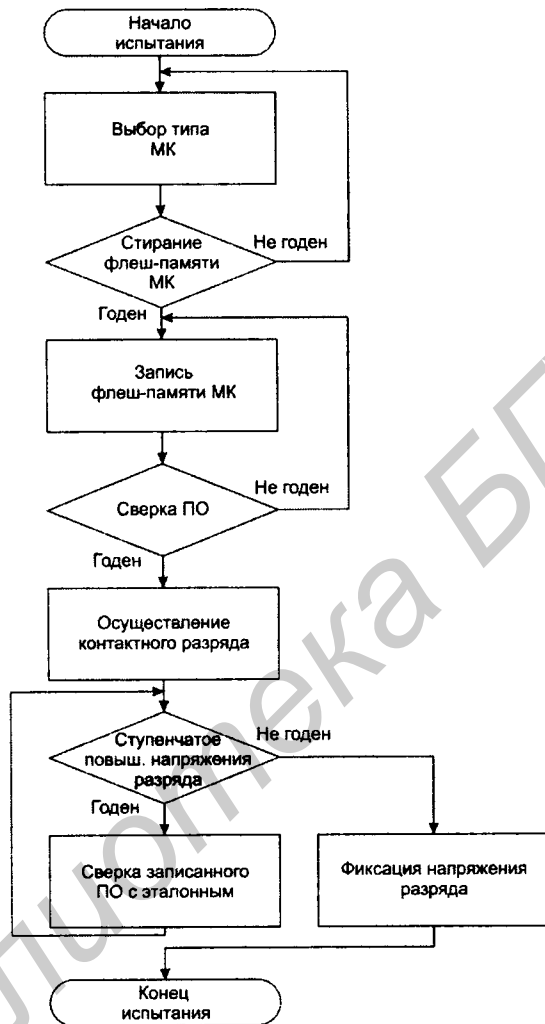


Рисунок 1 – Алгоритм определения значения напряжения, при котором происходит некорректное срабатывание запрограммированных функций микроконтроллеров со встроенной флеш-памятью после воздействия статического электричества по методу контактного разряда

Некорректное выполнение запрограммированных функций, выявленное в процессе работы микроконтроллера и обусловленное влиянием электростатических разрядов, целесообразно диагностировать с помощью разработанных

специализированных тестовых программ (ТП). Такие программные средства ориентированы под конкретную архитектуру микроконтроллера и позволяют выявить дефекты на уровне функционального блока (ФБ). Результаты выполнения тестирования представляются таблицей состояния функциональных блоков (таблица 1), в которую вносятся значения корректного «1» или некорректного «0» выполнения тестовых программ.

Таблица 1 – Пример таблицы состояния функциональных блоков микроконтроллера

Тестовая программа	Функциональный блок								
	ФБ1	ФБ2	ФБ3	ФБ4	ФБ5	ФБ6	ФБ7	...	ФБл
ТП1	1	0	0	1	1	1	0	...	0
ТП2	1	0	1	0	1	0	1	...	0
...
ТПл
Результат теста	1	0	0	0	1	0	0	...	0

Исходя из специфики проведения испытаний микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память программным обеспечением на устойчивость к воздействию статического электричества по методу контактного разряда, предложена методика анализа целостности кода, состоящая из трех этапов: «подготовительный», «экспериментальный» и «аналитический».

Основной целью «подготовительного» этапа является выявление потенциально ненадежных изделий. Это осуществляется за счет определения критериев отбраковки, проведения отбраковочных испытаний, а также в результате анализа встроенной флеш-памяти с учетом специфики процессов стирания, записи и инициализации программного обеспечения.

На «экспериментальном» этапе определяются значения напряжения, при которых ухудшается функционирование флеш-памяти с определением степени повреждения массива данных.

На «аналитическом» этапе осуществляется анализ достоверности полученных результатов и формирование групп микроконтроллеров по надежности. Это реализуется за счет проведения повторных испытаний, в которых были выявлены повреждения/ухудшение качества выполнения запрограммированных функций.

В пятой главе представлены результаты испытаний микроконтроллеров, которые наиболее распространены среди производителей современных электронных средств различного целевого назначения.

Для определения возможностей разработанных методик контроля функциональных и эксплуатационных характеристик после воздействия электростатических разрядов были диагностированы следующие 8-разрядные микроконтроллеры: Attiny 2313/V (изготовитель Atmel); IN89C2051DW (изготовитель ОАО «ИНТЕГРАЛ») и AT89C51RC (изготовитель Atmel).

Основными требованиями к проведению экспериментов являлись:

- модель воздействия разряда – «модель тела человека»;
- тип разряда – контактный;
- количество разрядов – по 5 шт. каждой полярности;
- полярность – положительная и отрицательная;
- область воздействия – наружный вывод, отвечающий за операцию ввода/вывода информации;
- испытательный генератор – ESD 3000;
- функции анализа массива данных (хеш-функции) – MD5 и SHA-1.

Для воздействия статического электричества по методу контактного разряда разрядный наконечник испытательного генератора располагался перпендикулярно поверхности наружных выводов микроконтроллера, что позволило улучшить повторяемость результатов проводимых испытаний (рисунок 2).

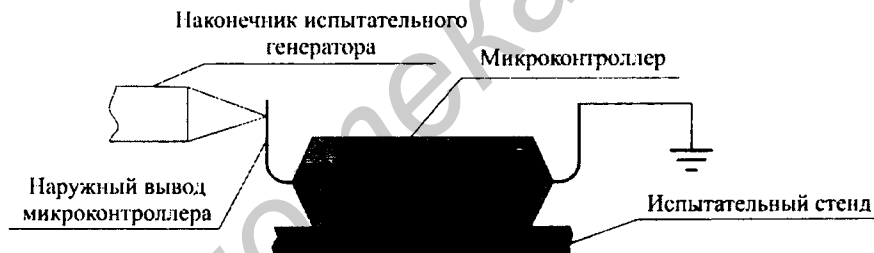


Рисунок 2 – Схема расположения разрядного наконечника испытательного генератора при воздействии статического электричества по методу контактного разряда

Значения напряжений воздействующего импульса на микроконтроллеры (250 В, 500 В, 1 кВ, 2 кВ и 4 кВ) соответствуют значениям, приведенным в действующих на территории Республики Беларусь стандартах в области проведения испытаний на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества. Для наиболее точного определения значений напряжения, при котором возникают те или иные изменения в массиве данных, оно повышалось со стандартного значения с шагом 100 В.

На основании проведенных экспериментов были получены следующие результаты технической диагностики для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V.

При стандартных напряжениях разряда и из диапазона от 4,1 по 4,9 кВ, не было выявлено никаких изменений ни в одном из функциональных блоков. Составленная матрица состояний соответствовала эталонной таблице.

Следующее напряжение воздействующего импульса соответствовало значениям от 5,0 по 5,2 кВ. Оно не является стандартным, но его выбор обусловлен проведенным анализом технического описания на данный тип микроконтроллера. При воздействии на наружные выводы разрядом не было выявлено никаких изменений в выполнении запрограммированных функций и эталонное значение контрольных сумм осталось без изменений. Однако при осуществлении процесса стирания и записи было выявлено, что контрольные суммы записанного во флеш-память кода не соответствуют эталонному значению, что свидетельствует о возникновении повреждений в структуре кристалла.

Из анализа полученных контрольных сумм после повторной записи программного кода можно сделать вывод о том, что начальным значением напряжения, при котором начинаются изменения в массиве данных, является 5,0 кВ.

После воздействия электростатического разряда напряжением от 5,2 по 5,4 кВ на наружные выводы микроконтроллера было выдано программное сообщение «*неверный идентификатор микросхемы*». Это привело к некорректному сравнению, чтению, стиранию и контролю записываемого массива данных. Учитывая то, что из памяти микроконтроллеров невозможно было обеспечить считывание какой-либо информации, то снять контрольные суммы и сверить их значения с эталонными не представлялось возможным.

В результате функционального контроля диагностируемых микроконтроллеров после воздействия разрядами напряжением 5,4 кВ и выше составить матрицу результатов не представлялось возможным, что обусловлено полной утратой работоспособности микроконтроллера.

Для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V, в которых были выявлены нарушения в инсталлированном массиве данных, можно выделить три диапазона напряжений: от 5,0 до 5,2 кВ – область функционального нарушения; от 5,2 до 5,4 кВ – область программного нарушения и от 5,4 кВ – область полной утраты работоспособности.

При диагностике микроконтроллеров типа IN89C2051DW производились разряды со стандартными напряжениями и из диапазона от 1,1 до 1,4 кВ. Составляя матрицу состояния, автором не было выявлено никаких изменений ни в одном из функциональных блоков.

При воздействии разряда напряжениями от 1,4 до 1,8 кВ в работе микроконтроллеров данного типа не было выявлено никаких сбоев при форматировании и перезаписи программного обеспечения. Однако при осуществлении процесса формирования контрольных сумм с использованием двух специализированных хеш-функций были получены значения не соответствующие эталон-

ным. Это указывает на то, что исходный записанный код претерпел изменения. Таким образом, начальным значением напряжения, при котором начинается изменение в инсталлированном программном обеспечении, является 1,4 кВ.

На этапе функционального контроля исследуемых микроконтроллеров после воздействия напряжениями разрядов из диапазона от 1,8 кВ и выше составить матрицу результатов было невозможно, что обусловлено полной утратой работоспособности и отсутствием возможности определения каких-либо параметров с использованием специализированного программатора.

После проведения экспериментов по функциональной диагностике микроконтроллеров типа IN89C2051DW были выявлены нарушения в массиве данных, вызванные разрядами с напряжением из трех диапазонов: от 1,4 до 1,8 – область программного нарушения и от 1,8 кВ и выше – область полной утраты работоспособности.

При проведении экспериментов по функциональной диагностике микроконтроллеров типа AT89C51RC были осуществлены воздействия статического электричества по методу контактного разряда со стандартными напряжениями, а также из диапазона от 4,1 до 5,9 кВ. Анализ состояния функциональных блоков микроконтроллера, показал, что в коде никаких изменений не установлено.

При воздействии импульсами напряжением от 6,0 до 6,2 кВ, при осуществлении перезаписи массива данных было получено следующее программное сообщение *«ошибка сравнения при $U_{CC}=5,00V$ по адресу 00000000 вместо 02 записано 52»*, подтверждающее появление дефекта, что может привести к некорректному срабатыванию. Время записи данных увеличилось с 1 мин 50 с до 30 мин 57 с.

Действие разряда напряжением от 6,2 по 6,4 кВ привело к существенным изменениям данных, так как было повреждено 94 % информации, инсталлированной во встроенную флеш-память микроконтроллера. Выявленное ухудшение было обнаружено при сверки записанного массива данных с эталонным.

На этапе функционального контроля исследуемых устройств, в случае воздействия импульсами напряжением от 6,4 кВ и выше составить матрицу результатов не представлялось возможным из-за полной утраты работоспособности и отсутствия возможности определения каких-либо параметров.

В микроконтроллерах типа AT89C51RC были выявлены нарушения в инсталлированном во встроенную флеш-память массиве данных при разрядах из трех диапазонов напряжений: от 6,0 до 6,2 кВ – область функционального нарушения; от 6,2 до 6,4 кВ – область программного нарушения и от 6,4 кВ и выше – область полной утраты работоспособности.

В приложениях приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс и производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Полученные в рамках диссертационной работы теоретические и практические результаты направлены на совершенствование алгоритмов и методик контроля функциональных и эксплуатационных характеристик интегральных схем (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) после воздействия статического электричества по методу контактного разряда.

1. Выполнен анализ существующих методик контроля функциональных и эксплуатационных характеристик интегральных схем (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества. Показано, что в результате такого влияния происходит не только изменение статических и динамических параметров микроконтроллеров, но и велика вероятность повреждения программного кода, хранящегося в памяти. Обоснована необходимость разработки новых подходов к технической диагностике микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных [1–А, 4–А, 5–А].

2. Предложено рассматривать распространение теплового поля, возникающего вследствие контактного разряда статического электричества, для каждой токопроводящей области микроконтроллера: «наружный вывод» – «внутренний вывод» – «контактная площадка» – «металлизация» – «полупроводниковый кристалл», что позволяет определить распределение градиентов температур в указанных областях. Разработана методика расчета распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллеров в результате воздействия статического электричества по методу контактного разряда напряжением из диапазона от 2 до 25 кВ на наружный вывод, базирующаяся на решении уравнений теплопроводности и электропроводности [3–А, 7–А, 8–А, 9–А, 10–А, 11–А].

3. Выполнена постановка и формализация задач по оценке влияния электростатического разряда на изменение программного кода, установленного во встроенную флеш-память микроконтроллера. Разработана методика испытаний по определению области неустойчивого функционирования микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных после воздействия разрядов статического электричества. Показано, что области неустойчивого функционирования микроконтроллеров, при котором происходят повреждения в записанном программном коде, составляют: для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V – свыше 90 % от предельного значения напряжения разряда; для микроконтроллеров типа IN89C2051DW – свыше 75 %

от предельного значения напряжения разряда; для микроконтроллеров типа AT89C51RC – свыше 95 % от предельного значения напряжения разряда [2–А, 3–А, 6–А].

4. Разработана методика анализа целостности программного обеспечения инсталлированного во встроенную флеш-память микроконтроллеров, базирующаяся на применении специализированных хеш-функций, после воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод микроконтроллера. В результате проведенных экспериментов установлены повреждения в записанном коде при следующих напряжениях: для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V – от 5,0 до 5,2 кВ – область функционального нарушения, от 5,2 до 5,4 кВ – область программного нарушения; для микроконтроллеров типа IN89C2051DW – от 1,4 до 1,8 – область программного нарушения; для микроконтроллеров типа AT89C51RC – от 6,0 до 6,2 кВ – область функционального нарушения, от 6,2 до 6,4 кВ – область программного нарушения. Выполнена оценка влияния разрядов статического электричества на изменение функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров [2–А, 12–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные в диссертационной работе методики контроля функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров с инсталлированным во встроенную флеш-память программным обеспечением после воздействия статического электричества по методу контактного разряда могут быть рекомендованы к практическому использованию при реализации работ по проектированию и разработке микроконтроллеров, организации защитных структур на полупроводниковом кристалле от импульсных воздействий разрядов, выявлению наиболее чувствительных локальных зон и т.д.

2. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс на кафедре радиоэлектронных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (лекционные курсы «Микропроцессорные системы в радиоэлектронных устройствах»; «Микропроцессорные системы и их применение» и «Конструирование приборов систем безопасности»), на кафедре робототехнических систем Белорусского национального технического университета (лекционный курс «Микроконтроллеры в системах управления»), на кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств учреждения образования «Полоцкий государственный университет» (лекционный курс «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств»), а также на кафедре телекоммуникационных систем учреждения образования «Высший государственный колледж связи» (лекционные курсы

Техническая эксплуатация систем коммутации и передачи» и «Функциональные устройства и электропитание систем телекоммуникаций»).

3. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях Республики Беларусь при выполнении таких работ, как: осуществление технологических отбраковочных операций современных микроконтроллеров со встроенной электрически перепрограммируемой флеш-памятью (УП «КБТЭМ-ОМО»); разработка инновационных проектов в области автоматизированных систем управления технологическими процессами (ПЧУП «КОЭЛИ»); сборка, техническое обслуживание и ремонт кассового оборудования (ОДО «НТС» с годовым экономическим эффектом от внедрения 5 051 552 (пять миллионов пятьдесят одну тысячу пятьсот пятьдесят два) руб., ОАО «БелВТИ», НТООО «СВЯЗЬИНФОРМСЕРВИС»); осуществление проверки целостности программного кода (ОАО «Завод Спецавтоматика»); ремонт, проверка и техническая диагностика интегрированных систем безопасности (ООО «Инновационная компания «ИНТЕС»); инновационных разработках в сфере автоэлектроники и измерительной техники (СП «Технотон», ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ»).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев, Н.И. Силков, Г.А. Пискун, А.Н. Пикулик // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С. 5–12.

2–А. Алексеев, В.Ф. Методика оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию разрядов статического электричества при ступенчатом повышении напряжения / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 2 (40). – С. 34–40.

3–А. Пискун, Г.А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 12–18.

4–А. Алексеев, В.Ф. Влияние разрядов статического электричества на программное обеспечение, инсталлированное во встроенную flash-память микроконтроллеров / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Радиоэлектроника и информатика. – 2012. – № 3 (58). – С. 8–12.

5–А. Брылева, О.А. Основные механизмы повреждения микроконтроллеров вследствие влияния электростатических разрядов / О.А. Брылева, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 130–137.

6–А. Пискун, Г.А. Методы технической диагностики микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 156–163.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7–А. Пискун, Г.А. Компьютерное моделирование процесса развития электростатического разряда в COMSOL Multiphysics / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 16–18 ноября 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – С. 378–379.

8–А. Пискун, Г.А. Математическое описание развития ЭСР в газовой среде в программном пакете COMSOL Multiphysics / Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 16–18 ноября 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – С. 380–381.

9–А. Алексеев, В.Ф. Калибровка систем измерения тока разряда как одно из условий получения достоверных результатов при проведении испытаний ра-

диоэлектронного оборудования на устойчивость к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, О.А. Кистень // Научные стремления – 2011: материалы Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, Респ. Беларусь, 14–18 ноября 2011 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2011. – С. 613–617.

Тезисы докладов на научных конференциях

10–А. Пискун, Г.А. Математическое описание процесса формирования источника тепла при воздействии мощного электромагнитного импульса на интегральные схемы / Г.А. Пискун // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ–2010»: матеріали 6-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., Севастополь, Україна, 19–24 квітня 2010 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т; редкол.: Ю.Б. Гимпилевич [і др.]. – Севастополь, 2010. – С. 420.

11–А. Пискун, Г.А. Расчет тепловых процессов во внутренних выводах интегральных схем при протекании импульсного тока / Г.А. Пискун // Сб. тезисов 28-ой науч.-техн. конф. ОАО «АГАТ-системы управления», Минск, Беларусь, 11–12 мая 2011 г. / ОАО «АГАТ-системы управления». – Минск, 2011. – С. 68–69.

Патент

12–А. Способ испытания микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов : пат. 17253 Респ. Беларусь, МПК G 01R 31/26, G 11C 29/52 / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева; заявитель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – № а 20120290; заявл. 28.02.2012; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 142–143.



РЭЗІЮМЭ

Піскун Генадзій Адамавіч

Методыкі кантролю

функцыянальных і эксплуатацыйных характарыстык мікракантролераў пасля ўздзеяння электростатычных разрадаў

Ключавыя словы: электростатычны разрад, мікракантролер, мадэль, надзейнасць.

Мэта работы: даследаванне ўздзеяння разрадаў статычнай электрычнасці на інтэгральныя схемы (на прыкладзе мікракантролераў з інсталюваным ва ўбудаваную флэш-памяць масівам дадзеных) і распрацоўцы методыкі выяўлення пашкоджанняў запісанага ва ўбудаваную флэш-памяць кода пасля ўздзеяння электростатычных разрадаў.

Атрыманая вынікі і іх навізна: распрацавана методыка разліку размеркавання тэмпературы ў токаправодзячых элементах мікракантролераў ў выніку ўздзеяння статычнай электрычнасці па метады кантактнага разраду на вонкавую выснову, якая заснавана на сістэме раўнанняў цеплаправоднасці і электраправоднасці, што дазваляе вырабляць прагназаванне адмовы. Прадстаўлена методыка эксперыментальнага вызначэння галіны няўстойлівага функцыянавання мікракантролераў ва ўмовах ўздзеяння статычнай электрычнасці, што дазваляе пашырыць магчымасці дыягнаставання мікракантролераў і электронных сістэм на іх базе да наступу непрацаздольнага стану. Распрацавана методыка аналізу цэласнасці інсталюванага ва ўбудаваную флэш-памяць мікракантролера праграмнага забеспячэння пасля ўздзеяння статычнай электрычнасці па метады кантактнага разраду на вонкавую выснову, якая дазваляе вызначыць ступень пашкоджання кода і ацаніць уплыў дадзеных змяненняў на функцыянальныя і эксплуатацыйныя характарыстыкі мікракантролераў.

Ступень выкарыстання: атрыманая ў рабоце вынікі адлюстраваны ў навукальным працэсе на кафедры радыёэлектронных сродкаў установа адукацыі БДУР, на кафедры робататэхнічных сістэм БНТУ, на кафедры канструявання і тэхналогіі радыёэлектронных сродкаў ўстанова адукацыі ПДУ, а таксама на кафедры тэлекамунікацыйных сістэм ўстанова адукацыі ВДКС.

Вынікі даследаванняў ўкаранены на такіх прадпрыемствах Рэспублікі Беларусь, як УП «КБТЭМ-ОМА», ВПУП «Козьлю», ТДА «НТС», ААТ «БелВТІ», НТААА «Сувязьінфармсэрвіс», ААТ «Завод Спецавтоматыка», ТАА «Інавацыйная кампанія "ІНТЭС"», СП «Технотон» і ААТ «МАЗ» – кіруючая кампанія холдынга «БелаўтаМАЗ».

Вобласць ужывання: мікрапрацэсарныя сістэмы, электронныя сродкі.

РЕЗЮМЕ

Пискун Геннадий Адамович

Методики контроля

функциональных и эксплуатационных характеристик микроконтроллеров после воздействия электростатических разрядов

Ключевые слова: электростатический разряд, микроконтроллер, модель, надежность.

Цель работы: исследование воздействия разрядов статического электричества на интегральные схемы (на примере микроконтроллеров с установленным во встроенную флеш-память массивом данных) и разработке методики выявления повреждений записанного во встроенную флеш-память кода после воздействия электростатических разрядов.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика расчета распределения температуры в токопроводящих элементах микроконтроллеров в результате воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод, которая основана на системе уравнений теплопроводности и электропроводности, что позволяет производить прогнозирование отказа. Представлена методика экспериментального определения области неустойчивого функционирования микроконтроллеров в условиях воздействия статического электричества, что позволяет расширить возможности диагностирования микроконтроллеров и электронных систем на их базе до наступления неработоспособного состояния. Разработана методика анализа целостности установленного во встроенную флеш-память микроконтроллера программного обеспечения после воздействия статического электричества по методу контактного разряда на наружный вывод, позволяющая определить степень повреждения кода и оценить влияние данных изменений на функциональные и эксплуатационные характеристики микроконтроллеров.

Степень использования: полученные результаты отражены в учебном процессе на кафедре радиоэлектронных средств БГУИР, кафедре робототехнических систем БНТУ, кафедре конструирования и технологии радиоэлектронных средств УО ПГУ, а также на кафедре телекоммуникационных систем УО ВГКС.

Результаты исследований внедрены на таких предприятиях Республики Беларусь, как УП «КБТЭМ-ОМО», ПЧУП «КОЭЛИ», ОДО «НТС», ОАО «БелВТИ», НТООО «СВЯЗЬИНФОРМСЕРВИС», ОАО «Завод Спецавтоматика», ООО «Инновационная компания «ИНТЕС»», СП «Технотон» и ОАО «МАЗ» - управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ».

Область применения: микропроцессорные системы, электронные средства.

SUMMARY

Piskun Genadzi Adamovich

**Methods of control
of functional and operational characteristics
of microcontrollers after exposure of electrostatic discharge**

Keywords: electrostatic discharge, a microcontroller, a model, a reliability.

Objective: study the impact of static electricity on integrated circuits (e.g. microcontrollers with array of data installed on the built-in flash memory) and the development of methodology for the identification of damaged code stored in the built-in flash memory after exposure of electrostatic discharge.

The results and novelty: developed calculation method of the temperature distribution in the conductive elements of the microcontroller after exposure of static electricity using the method of contact discharge exposure of the outer terminal, which is based on a system of equations of thermal and electrical conductivity, which allows predict failures. Observed the technique of experimental determination of unstable operation of microcontrollers under conditions of static electricity, which expands the possibilities of diagnosis of microcontrollers and electronic systems based on microcontrollers before the inoperable state. Developed the technique of analysis of the integrity of the software installed in the microcontroller built-in flash memory after exposure of static electricity using the method of contact discharge to the outer terminal, which allows to determine the extent of damage of the code, and to estimate the impact of these changes to the functional and operational characteristics of the microcontrollers.

Area of usage: the results obtained are reflected in the educational process at the department of radio electronic facilities of the educational establishment «Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics», at the department of robotic systems of the National Technical University, at the department of design and technology radio electronic tools of the educational institution «Polotsk State University» and at the department of telecommunication systems of the educational institution «Higher State College of Communications».

The results of research have been implemented in such enterprises of the Republic of Belarus, as a UE «КБТЭМ-ОМО», PPUE «Coelho», double liability «NTS», OJSC «BelVTI», science and technology Co.Ltd «SVYAZINFORMSERVICE», OJSC «Plant Specavtomatika», a limited liability company «Innovative Company “Intes”», joint venture «Technoton» and OJSC «MAZ» – managing company «BELAGROMASH».

Scope: microprocessor-based systems, electronic funds.

Научное издание

Пискун Геннадий Адамович

**МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 19.09.2013.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 369.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.